IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

Exposition aux vibrations mécaniques engendrées par les meuleuses portatives

Paul-Émile Boileau
Henri Scory
Jérôme Boutin

Avril 1988

Étude/ Bilan de connaissances

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2e Trimestre 1988

ISBN: 2-551-06878-9
ISSN: 0820-8395

ÉTUDE / BILAN DE CONNAISSANCE

EXPOSITION AUX VIBRATIONS MÉCANIQUES ENGENDRÉES PAR LES MEULEUSES PORTATIVES

Paul-Emile Boileau
Henri Scory
Jérôme Boutin

"Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs."

© Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, 1988

SOMMAIRE

L'utilisation habituelle et prolongée de machines vibrantes tenues à la main est à l'origine de troubles et lésions qui sont de plusieurs ordres: vasculaire, nerveuse, musculaire ou osseuse. L'atteinte la plus connue est le phénomène de Raynaud, caractérisé par le blanchissement du bout des doigts. Dans les cas graves, les vaisseaux sanguins ne sont plus capables de se contracter et de se dilater. La circulation du sang est ralentie, d'où le risque occasionnel d'entraîner la gangrène.

Dans la présente étude, nous rapportons des résultats de mesures de vibrations effectuées sur des meuleuses portatives utilisées par des travailleurs dans un chantier naval. Les mesures sont effectuées sur différents modèles de meuleuses verticales, fonctionnant à l'air comprimé et opérant à des vitesses variant entre 6000 et 12000 rpm. On veut ainsi tenter d'établir des moyens de prévention pour contrer potentiellement l'apparition, ou tout au moins, la progression du phénomène de Raynaud chez les opérateurs de meuleuses dans un chantier naval.

L'étude comporte trois volets:

- comparaison des niveaux de vibration pour différents modèles de meuleuses sous des conditions contrôlées d'opération;

- comparaison des niveaux de vibration pour différentes méthodes de travail;

- évaluation de l'exposition typique des travailleurs aux vibrations mains-bras (segmentaires) lors d'opérations réelles exigeant différentes postures de travail.

Les résultats des mesures de vibrations sous des conditions contrôlées d'opération démontrent qu'il existe des différences importantes dans les niveaux de vibrations générés par les différents modèles de meuleuses et pour les différentes méthodes d'utilisation. Dans de telles conditions, il y a prédominance des vibrations sur la poignée gauche en direction parallèle à l'axe de rotation de la meuleuse. De plus, la fréquence dominante des vibrations apparaît généralement à la fréquence de rotation de la meule une fois que les vibrations sont pondérées en fréquences pour

tenir compte des variations de sensibilité des individus. De façon générale, le niveau global des vibrations est plus faible pour les meuleuses opérant à basse vitesse.

La méthode d'utilisation de la meuleuse à angle avec la surface du métal à traiter donne les niveaux de vibrations les moins élevés. La méthode consistant à faire sautiller ("danser") la meuleuse sur la pièce provoque les niveaux de vibrations les plus élevés, atteignant jusqu'à cinq (5) fois les niveaux mesurés lors d'un meulage à angle avec la pièce.

L'analyse en situation réelle de travail d'un des modèles de meuleuse dont la vitesse de rotation est 12000 rpm démontre que les niveaux d'exposition peuvent être particulièrement importants, la susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud s'établissant à 10% de la population des travailleurs après une ou deux années seulement d'opération continue.

Les auteurs recommandent que des actions soient entreprises afin de limiter le nombre de travailleurs susceptibles de développer le phénomène de Raynaud:

1- Que les modèles de meuleuses les moins vibrants soient utilisés. Ceux-ci ont généralement tendance à avoir une vitesse de rotation beaucoup plus basse ou peuvent être munis d'un dispositif de réduction du bruit; une analyse de leur productivité par rapport aux modèles ayant une vitesse de rotation plus grande devrait compléter l'évaluation de la meuleuse.

2- Que des recherches soient entreprises sur l'équilibrage de la meule qui semble avoir une influence importante sur les niveaux de vibrations générés.

3- Que dans la mesure du possible, une méthode de meulage privilégiant le meulage à angle avec la pièce soit encouragée tandis que l'utilisation du meulage par sautillement devrait être restreinte.

Des mesures préventives additionnelles proposées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) complètent le rapport.

TABLE DES MATIÈRES

SECTION — PAGE

1.- INTRODUCTION 7

2.- DESCRIPTION DU PROBLÈME 9

3.- MÉTHODOLOGIE 10

3.1 Étude comparative des vibrations pour différents types de meuleuses 10
3.2 Étude comparative des vibrations pour différentes méthodes de meulage 12
3.3 Évaluation de l'exposition typique des opérateurs de meuleuses à des vibrations segmentaires 12

4.- RÉSULTATS ET DISCUSSION 13

4.1 Essais comparatifs pour différents types de meuleuses 13
4.2 Niveaux de vibrations associés à différentes méthodes de meulage 16
4.3 Exposition aux vibrations reliée à l'opération de meuleuses lors d'activités représentatives de la fabrication d'un dôme de sonar de bateau 17

5.- CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 20

BIBLIOGRAPHIE 23

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

FIGURE PAGE

1- Système de coordonnées indiquant la direction des vibrations mesurées selon (a) les axes y_h, et z_h et (b) l'axe x_h pour chacune des deux poignées sur une meuleuse verticale 24

2- Spectres en fréquences (non-pondérés) des vibrations mesurées sur chacune des poignés d'une meuleuse (no.1) pneumatique verticale ayant une vitesse de rotation de 7700 rpm 25

3- Susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud en fonction de la durée quotidienne et du nombre d'années d'exposition aux vibrations générées par une meuleuse pneumatique verticale (no.5) en situation réelle de travail 29

TABLEAU

1- Valeurs d'accélération globale pondérée sur chaque poignée des meuleuses pour chacune des directions x_h, y_h et z_h lors d'essais contrôlés 26

2- Valeurs d'accélération globale pondérée sur chaque poignée de la meuleuse no.5 pour différentes méthodes de meulage lors d'essais contrôlés 27

3- Niveaux d'accélération globale pondérée sur chaque poignée de la meuleuse no.5 pour différentes configurations de travail 28

1. INTRODUCTION

Les meuleuses portatives sont les outils qu'utilisent le plus grand nombre de travailleurs parmi les différents secteurs d'activité économique. Au Québec, des statistiques de 1981 [1] révèlent que plus de 85,000 travailleurs se servaient quotidiennement d'une meuleuse dans le cadre de leur travail. Cependant, étant donné que dans plusieurs cas le travailleur n'utilise pas uniquement une meuleuse, il est difficile d'évaluer la durée quotidienne d'exposition aux vibrations due à cet outil spécifique.

Il est reconnu [2] que les vibrations générées par les meuleuses proviennent de trois sources: la machine (i.e. meuleuse) elle-même, l'outil de la meuleuse (i.e. meule) et le contact de l'outil avec la pièce à usiner. Pour les deux premières sources, les vibrations résultent de défauts d'équilibrage du moteur proprement dit, mais surtout de la meule qui créent un balourd dynamique par rapport à l'arbre de fixation. Lorsque la meule est mise en contact avec la pièce à travailler, des vibrations supplémentaires apparaissent dont l'amplitude et les fréquences dépendent de paramètres tels que: la dureté du matériau traité, la vitesse de rotation de l'outil, la granulométrie de la meule, l'effort exercé par l'opérateur sur la machine et l'expérience de l'opérateur lui-même. Ces différents facteurs doivent donc être pris en considération lorsqu'il s'agit de comparer les niveaux de vibrations effectivement émis par différents types de meuleuses.

L'utilisation habituelle et prolongée de machines vibrantes tenues à la main est à l'origine de troubles et lésions qui sont de plusieurs ordres [3]: vasculaire, nerveuse, musculaire ou osseuse. L'atteinte la plus connue est le phénomène de Raynaud, caractérisé par le blanchissement du bout des doigts. Dans les cas graves, les vaisseaux sanguins ne sont plus capables de se contracter et de se dilater. La circulation du sang est ralentie, d'où le risque occasionnel d'entraîner la gangrène.

Au Québec, il y a eu entre 1976 et 1984 près de 250 demandes d'indemnité reliées au phénomène de Raynaud (statistiques de la CSST). Ces statistiques n'indiquent en rien toute l'ampleur du problème puisque l'on doit constater encore aujourd'hui que le problème demeure relativement peu connu. Qu'il suffise d'indiquer que pour sensiblement la même période, l'Ontario acceptait plus de 800 demandes d'indemnisation provenant du secteur des mines seulement. Aux États-Unis, une étude [4] effectuée chez des populations de travailleurs utilisant des meuleuses et des marteaux burineurs révélait une prédominance du phénomène de Raynaud chez 47 % des travailleurs de fonderies et 19 % des travailleurs de chantiers navals.

La présente étude rapporte les résultats de mesures de vibrations effectuées sur des meuleuses portatives utilisées par des travailleurs dans un chantier naval. Les mesures sont effectuées sur différents modèles de meuleuses verticales, fonctionnant à l'air comprimé et opérant à des vitesses variant entre 6000 et 12000 rpm. L'étude comporte trois volets:

- comparaison des niveaux de vibrations pour différents modèles de meuleuses sous les mêmes conditions contrôlées d'opération;

- comparaison des niveaux de vibrations pour différentes méthodes de travail;

- évaluation de l'exposition typique des travailleurs aux vibrations mains-bras (segmentaires) lors d'opérations en milieu de travail, pour différentes postures.

L'étude mène à des recommandations sur les moyens de prévention qui pourraient être mis en oeuvre pour contrer potentiellement l'apparition, ou tout au moins, la progression du phénomène de Raynaud chez les opérateurs de meuleuses dans un chantier naval.

2.0 DESCRIPTION DU PROBLÈME

Les activités visées par la présente étude consistent à effectuer des opérations de meulage sur des dômes de sonar devant être installés sous des bateaux. On veut ainsi rectifier les cordons de soudure et par la suite polir la surface touchée, de façon à rencontrer les exigences relatives aux variations de l'épaisseur du métal pour une surface donnée. Le métal traité est un acier de type MIL-S-22698, Classe U, Grade DH 36.
La configuration du dôme est telle qu'elle nécessite différentes postures de travail de la part du meuleur; celui-ci devant tantôt opérer la meuleuse de revers en maintenant la machine au bout de ses bras ou encore travailler avec la meuleuse directement en face de lui.

La fabrication d'un dôme de sonar peut nécessiter entre 3000 et 4000 heures de meulage. Étant donné que 12 dômes peuvent potentiellement être fabriqués au cours d'une année, il importe de connaître les niveaux d'exposition aux vibrations auxquels les travailleurs peuvent être soumis, de façon à pouvoir prévoir certains moyens de contrôle, qu'ils soient d'ordre technique (e.g. modifications aux meuleuses), méthodologique (e.g. variation de la façon de travailler) ou administratif (e.g. horaire de travail).

De façon générale, les travailleurs du chantier naval utilisent trois différents types de meuleuses pour lesquelles la vitesse de rotation varie entre 6000 et 12000 rpm. La meule a une épaisseur de deux pouces et est de type boisseau conique avec forte granulométrie. Lors des opérations, la meuleuse est d'abord opérée à un angle avec la pièce traitée pour dégager l'excédent de soudure. L'opération de polissage qui succède peut être effectuée de deux façons: par meulage circulaire avec la surface entière de la meule en contact avec la pièce ou par meulage en faisant sautiller ou "danser" la meuleuse sur la pièce. Dans ce dernier cas, un débalancement volontaire de la machine est provoqué qui résulte en des forces dynamiques excédant la force statique exercée par l'opérateur pour maintenir la meuleuse sur la pièce.

3.0 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie est adaptée à l'étude comparative des types de meuleuses, des méthodes de travail et à l'évaluation de l'exposition typique.

3.1 Étude comparative des vibrations pour différents types de meuleuses

Cette partie de l'étude consiste à évaluer les niveaux d'exposition aux vibrations segmentaires résultant de l'opération de différents types de meuleuses dans des conditions similaires de travail. Cinq modèles différents de meuleuses pneumatiques verticales sont mis à l'essai dont la vitesse de rotation maximale est 7700 rpm pour une d'entre elles, (no.1), à 6000 rpm pour deux d'entre elles (nos.2,3) et à 12000 rpm également pour deux d'entre elles (nos.4,5). Deux des cinq meuleuses (nos.1 et 2) sont neuves et n'ont jamais servi aux travaux dans le chantier naval. Les autres meuleuses ont été utilisées depuis plusieurs années.

Lors des essais, les différentes meuleuses sont opérées par le même opérateur expérimenté. Dans tous les cas, le même type de meule est utilisé, dont les dimensions sont 4/3 x 2 x 5/8 -18. Bien que la vitesse de rotation maximale de la meule change pour les différentes meuleuses, la granulométrie est sensiblement la même. La pression maximale de l'air comprimé est de 620 kPa. Les opérations de meulage sont effectuées sur une plaque de métal dont les dimensions sont 19 x 152 x 508 mm. Le métal est du même type que celui utilisé pour fabriquer les dômes de sonar. Cette plaque est installée verticalement dans un étau et le meulage est effectué sur la surface 152 x 508 mm.

Pour les essais, l'opérateur effectue un meulage circulaire en tentant de maintenir la meule à plat sur la plaque et à une vitesse de rotation aussi constante que possible. Chaque essai a une durée d'une minute pendant laquelle les signaux vibratoires sont enregistrés sur ruban magnétique. Pour chacune des meuleuses, une

série de 10 essais sont effectués pendant lesquels les conditions d'opération sont maintenues aussi constantes que possible.

Au début de chaque série d'essais, pour chacune des meuleuses, une nouvelle plaque d'acier et une nouvelle meule sont utilisées. Les vibrations sont mesurées sur chacune des deux poignées dans les trois directions x_h, y_h, et z_h caractérisant le système de coordonnée biodynamique tel que défini dans la norme internationale ISO 5349 [5]. Dans ce système, l'axe z_h coïncide avec l'axe longitudinal du troisième métacarpien tandis que l'axe x_h est perpendiculaire à la paume de la main. La figure 1 illustre l'orientation de ces axes sur une meuleuse.

Deux accéléromètres triaxiaux B&K 4321 sont utilisés pour les mesures, un pour chaque poignée. Chaque accéléromètre est installé sur un adaptateur original dont les caractéristiques apparaissent en [6]. L'adaptateur est maintenu sur la poignée à l'aide d'un collier mécanique. Lors des essais, l'opérateur doit, dans la mesure du possible, maintenir l'adaptateur et le capteur entre le médius et l'annulaire.

À partir des capteurs, chacun des six canaux de mesure est relié à un amplificateur de charge B&K 2635 et de là, à une des 14 pistes sur un enregistreur magnétique Racal-Storehorse où tous les signaux sont enregistrés. Les signaux sont par la suite traités en laboratoire pour obtenir à chaque minute, un spectre en fréquences de l'énergie vibratoire entre 6.3 et 1250 Hz (norme ISO 5349). Ce traitement est répété pour chaque meuleuse, pour chacun des 6 canaux de mesure et chacun des 10 essais consécutifs. Le spectre moyen et l'écart-type sont calculés pour chacun des 6 canaux. Dans chaque cas, l'accélération efficace correspondant à l'énergie totale cumulée entre 6.3 et 1250 Hz est enfin évaluée.

3.2 Étude comparative des vibrations pour différentes méthodes de meulage

Cette partie de l'étude consiste à évaluer avec la meuleuse no. 5, les niveaux de vibrations provoqués par différentes méthodes de meulage. Les trois méthodes suivantes sont utilisées:

1 - meulage circulaire avec la meule à plat sur la plaque de métal;

2 - meulage en faisant sautiller ou "danser" la meuleuse sur la pièce;

3 - meulage à angle i.e. lorsque la meule forme un angle avec la pièce.

Pour chaque méthode de meulage, la même méthodologie que l'étude des différents types de meuleuses (3.1) est utilisée sauf que seulement deux essais d'une durée de 3 minutes chacun sont effectués pour chaque méthode de meulage.

3.3 Évaluation de l'exposition typique des opérateurs de meuleuse à des vibrations segmentaires

Cette dernière partie de l'étude vise à évaluer l'exposition typique aux vibrations segmentaires auxquelles sont soumis les opérateurs de meuleuse lors d'opérations courantes de travail sur les dômes de sonar. Comme les dômes n'étaient pas disponibles au moment des mesures, les conditions de travail ont été reproduites sur la charpente d'un bateau en construction. Des plaques de métal similaires à celles utilisées lors des essais précédents furent soudées à quatre endroits sur la charpente du bateau de façon à reproduire les configurations caractéristiques des dômes de sonar. L'opérateur devait donc adapter une posture de travail différente pour chacune des configurations qui incluaient:

- une surface horizontale parallèle au plancher devant être rejointe du dessous (i.e. meulage de revers avec la meuleuse au bout des bras);

- une surface verticale perpendiculaire au plancher devant être rejointe face au corps;

- une surface horizontale parallèle au plancher rejoignable du dessus (i.e. meulage sur un plancher);

- une surface courbée devant être rejointe du dessous.

Un cordon de soudure a, au préalable, été fixé sur chacune des plaques. L'opération de meulage consiste donc à dégager le cordon de soudure sur chacune des plaques en opérant la meuleuse à un angle avec la pièce. Dans un deuxième temps, le polissage est effectué, d'abord par meulage circulaire, puis enfin en faisant sautiller la meuleuse sur la pièce. Pour chacune des plaques, ce processus nécessite environ 5 minutes.

L'évaluation de l'exposition est effectuée avec la meuleuse no.5, qui représente le modèle le plus couramment utilisé pour ce genre d'activité au chantier naval. La même méthodologie est utilisé dans cette partie de l'étude. Le but visé est d'obtenir le niveau global d'accélération efficace pour 4 heures d'exposition quotidienne et d'utiliser la relation dose-effet de la norme ISO 5349 pour juger la sévérité de l'exposition.

4.0 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Essais comparatifs pour différents types de meuleuses

Les spectres de la répartition des niveaux de vibrations par bandes de fréquences de tiers d'octave entre 6.3 et 1250 Hz apparaissent à la figure 2 pour les vibrations mesurées dans les directions x_h, y_h et z_h sur chacune des deux poignées de la meuleuse no.1. Cette meuleuse produit les niveaux de vibrations

les moins élevés. Les observations suivantes résument la tendance générale des résultats pour les cinq modèles de meuleuses pneumatiques:

1) Il existe un axe dominant en direction x_h selon lequel les niveaux de vibrations sont les plus élevés par rapport aux autres directions. Cet axe est parallèle à l'axe de rotation de la meuleuse. Dans certains cas, le niveau global pondéré des vibrations dans la direction dominante peut dépasser jusqu'à 5 fois le niveau enregistré selon les deux autres axes y_h et z_h.

2) De façon générale, il y a prépondérance des niveaux de vibrations sur la poignée gauche pour toutes les directions mesurées. En moyenne, les niveaux mesurés selon l'axe dominant sont 1.7 fois plus élevés sur la poignée gauche que sur la poignée droite. Il faut cependant préciser que c'est sur la poignée droite que se trouve la gachette servant à actionner la meuleuse.

3) Bien que les niveaux de vibrations mesurés selon les axes y_h et z_h soient souvent d'amplitude similaire, la tendance est à ce que les niveaux mesurés en direction y_h soient légèrement plus élevés qu'en direction z_h.

4) Les spectres non pondérés en fréquences comportent généralement deux pics. Il y a d'abord un pic de plus faible amplitude qui se situe dans la bande de fréquences centrée sur 80 Hz pour les meuleuses dont la vitesse de rotation maximale est 6000 rpm et sur 100 Hz pour les meuleuses ayant une vitesse de rotation maximale de 7700 et 12000 rpm. Ce pic peut donc être associé à la fréquence de rotation de la meule. Le deuxième pic, d'amplitude dominante, se situe normalement entre 315 et 800 Hz selon l'axe x_h. Ce deuxième pic, beaucoup moins localisé pour les axes y_h et z_h, apparaît à une fréquence plus élevée que pour l'axe x_h, soit 800 à 1250 Hz.

L'amplitude du deuxième pic peut, dépendant des conditions, atteindre 10 fois l'amplitude des vibrations à la fréquence de rotation.

5) Une fois le spectre de l'énergie vibratoire pondéré en fréquences selon la recommandation de la norme ISO 5349, la fréquence dominante des vibrations apparaît dans la plupart des cas à la fréquence de rotation de la meule (i.e. 80 ou 100 Hz) sauf pour la meuleuse no.5, pour laquelle la fréquence dominante apparaît à environ 20 Hz.

6) La valeur efficace d'accélération des signaux par bande de fréquences entre 6.3 et 1250 Hz se maintient généralement entre 0.1 et 100 ms^{-2}, atteignant 130 ms^{-2} dans quelques exceptions.

7) La meuleuse no.4 comporte le niveau de vibrations global pondéré le plus élevé, soit 21 ms^{-2} selon l'axe dominant. Si lors d'opérations courantes de travail, cette meuleuse devait être utilisée de la même façon que lors des essais contrôlés, la susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud s'établirait à 10 % de la population des travailleurs après un peu plus d'un an d'utilisation continue à raison de 4 heures par jour (Annexe A, norme ISO 5349).

Bien que les spectres en fréquences de l'énergie vibratoire soient révélateurs en eux-mêmes, c'est plutôt l'énergie vibratoire globale cumulée entre 6.3 et 1250 Hz qui permet de juger de la sévérité d'une exposition. De plus, cette énergie doit être pondérée en fréquences afin de tenir compte de la variabilité de sensibilité des individus en fonction des fréquences des vibrations. La valeur de cette énergie peut être calculée en utilisant les pondérations en fréquences suggérées dans la norme ISO 5349. L'accélération globale pondérée $a_{h,w}$ caractérise cette énergie.

Le tableau 1 présente les valeurs de l'accélération globale pondérée mesurée sur chacune des poignées des cinq meuleuses selon les axes x_h, y_h et z_h. La norme ISO 5349 recommande d'utiliser les

niveaux de vibrations obtenus suivant l'axe prédominant pour juger de la sévérité des vibrations. Dans le cas des meuleuses étudiées, il s'agit clairement des niveaux de vibrations en direction x_h sur la poignée gauche. Les résultats indiquent donc que la meuleuse no.1 (7700 rpm) produit les niveaux de vibrations les moins élevés. Au deuxième rang, se classent les meuleuses no.2 et 3 (6000 rpm) qui produisent des niveaux de vibrations du même ordre de grandeur. La meuleuse no.5 (12000 rpm) suit au troisième rang, pour terminer avec la meuleuse no.4 (12000 rpm) pour laquelle les niveaux de vibrations sont les plus élevés. Les résultats démontrent donc qu'une meuleuse dont la vitesse de rotation est 12000 rpm génère plus de vibrations qu'une meuleuse dont la vitesse de rotation est plus faible.

Dans cette partie de l'étude, les paramètres étant susceptibles d'influencer les niveaux de vibrations (e.g. vitesse de rotation, force statique exercée par l'opérateur, pression d'alimentation d'air comprimé, et.) n'ont pu être contrôlés de façon absolue. C'est pourquoi, les résultats obtenus ne doivent être utilisés qu'à titre d'indicateur de l'ordre de grandeur relative des niveaux de vibrations pour les différents modèles de meuleuses. Un banc d'essai avec contrôle absolu des différents paramètres permettrait une comparaison plus exacte entre les différents modèles.

Bien que les résultats démontrent que les niveaux de vibrations sont généralement plus faibles pour une meuleuse opérant à une vitesse moins grande, il convient de souligner que le choix d'une meuleuse doit également être fait en fonction des tâches et de la productivité. Cependant, ces facteurs n'ont pu être considérés dans ce rapport qui s'est limité à une étude portant sur les vibrations.

4.2 Niveaux de vibrations associés à différentes méthodes de meulage

Le tableau 2 présente les résultats de mesures de vibrations effectuées pour les trois différentes méthodes de meulage lors

d'essais contrôlés. Ces résultats démontrent que la méthode de sautillement de la meuleuse sur la pièce provoque les niveaux de vibrations les plus importants; la valeur efficace d'accélération pouvant excéder 200 ms^{-2} à certaines fréquences. À l'opposée, l'opération de la meuleuse à un angle avec la pièce provoque le moins de vibrations. Prenant cette dernière méthode d'opération comme référence, le rapport des niveaux de vibrations mesurés selon l'axe dominant (x-gauche) devient environ 5:1 pour le meulage par sautillements et environ 3:1 pour le meulage circulaire avec la meule à plat sur la pièce. Ainsi donc, l'opération de la meuleuse à angle avec la pièce permettrait une durée d'exposition 5 fois plus longue qu'une opération par sautillement et 3 fois plus longue qu'un meulage circulaire pour provoquer les mêmes effets chez une population d'opérateurs de meuleuses.

Une analyse des spectres en fréquences des vibrations générées lors des différentes opérations démontre que pour les meulages circulaire et par sautillement, les composantes dominantes des vibrations pondérées se retrouvent à 20 et 10 Hz respectivement. Par contre, la fréquence dominante apparaît généralement à une fréquence supérieure à 100 Hz lors du meulage à angle tandis que des niveaux très faibles apparaissent à basses fréquences. Comme les vibrations de basses fréquences prennent beaucoup plus d'importance au niveau des effets potentiels sur le système mains-bras, le meulage à angle produit un niveau d'accélération globale pondérée inférieur au niveau global pondéré lors des deux autres méthodes de meulage.

4.3 Exposition aux vibrations reliée à l'opération de meuleuses lors d'activités représentatives de la fabrication d'un dôme de sonar de bateau

Le niveau d'accélération globale pondérée mesuré sur chaque poignée de la meuleuse no. 5 apparaît dans le tableau 3 pour les 4 configurations (postures) de travail lors du meulage en conditions réelles de travail. Contrairement aux résultats obtenus lors des essais contrôlés avec cette meuleuse, c'est en direction y_h, la direction parallèle à l'axe de la poignée, que les vibrations

démontrent une prédominance et ce, sur la poignée gauche pour 3 des 4 configurations (postures). Comme le niveau global est obtenu par intégration des vibrations lors d'opérations incluant une combinaison des méthodes de meulage apparaissant au tableau 2, cette dominance des vibrations en direction y_h peut s'expliquer par l'importance des niveaux de vibrations démontrés dans cette direction pour la méthode de meulage à un angle avec la pièce, associé aux niveaux non-négligeables produits dans cette direction lors du polissage. Cependant, la grandeur du niveau global de vibrations selon l'axe dominant demeure très comparable au niveau mesuré sur la meuleuse no. 5 lors des essais contrôlés avec meulage circulaire.

De façon générale, les résultats apparaissant dans le tableau 3 ne permettent pas de distinguer une différence marquante entre les niveaux de vibrations mesurés pour les différentes configurations de travail. Dans le pire des cas (i.e. surface courbée), le niveau de vibrations selon l'axe dominant est 20.5 ms^{-2}. La relation dose-effet proposée en annexe de la norme ISO 5349 peut être utilisée pour prédire la susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud en fonction de la durée quotidienne d'exposition aux vibrations et du nombre d'années d'exposition. Cette relation, appliquée à la configuration de travail impliquant une surface courbée, apparaît graphiquement dans la figure 3 et indique qu'à un tel niveau de vibrations, 10 % de la population de travailleurs peut potentiellement être atteinte du phénomène de Raynaud après un nombre d'années d'exposition variant entre 1.2 et 2.9 années, si la durée d'exposition quotidienne est fixée à 6 heures et 1 heure respectivement. Les autres courbes de la figure 3 expriment la susceptibilité d'atteinte probable pour 20, 30, 40 et 50 % de la population.

Il est clair d'après la relation dose-effet de la norme ISO 5349, que pour 10 à 50 % de la population susceptible d'être atteinte, la période de latence requise avant l'apparition de symptômes reliés au phénomène de Raynaud peut être prolongée si le niveau d'exposition aux vibrations et la durée d'exposition quotidienne sont diminués. De ces deux facteurs, le niveau d'exposition a le plus d'influence sur l'effet global puisque la période de

latence est inversement proportionnelle au niveau d'accélération globale pondérée. Ainsi donc la période de latence pourrait être doublée en diminuant de moitié les niveaux d'exposition aux vibrations.

D'autre part, la période de latence n'est inversement proportionnelle qu'à la racine carrée de la durée quotidienne d'exposition. Le fait de diminuer de moitié le nombre d'heures d'exposition quotidienne ne contribuerait donc qu'à augmenter la période de latence par un facteur de 1.4. Pour le cas étudié, la période de latence augmenterait de 1.2 à 1.7 année en réduisant la durée d'exposition quotidienne de 6 à 3 heures pour une susceptibilité minimale de 10 % de la population. Ceci constitue en somme une mesure de contrôle drastique du point de vue de la productivité, dont les conséquences probables ne seraient que de retarder d'environ 6 mois l'apparition du phénomène de Raynaud, du moins d'après les prévisions de la relation dose-effet annexée à la norme ISO 5349.

Évidemment ces résultats ne peuvent être interprétés de façon absolue puisque la relation dose-effet est basée sur des études épidémiologiques qui ne tiennent compte ni des différences biologiques entre opérateurs, ni de l'intermittence des opérations au cours de la journée et de l'année [7]. La force de préhension pour soutenir l'outil constitue un autre facteur qui, bien que n'apparaissant pas spécifiquement dans la relation dose-effet, pourrait faire varier la période réelle de latence associée au développement du phénomène de Raynaud.

Il est clair toutefois que les niveaux de vibrations avec la meuleuse no.5, lors d'opérations normales de travail, excèdent les valeurs limites proposées dans le guide de l'ACGIH [8], celles-ci étant fixées entre 4 et 6 ms^{-2} pour une durée d'exposition quotidienne variant entre 2 et 8 heures. Selon ce guide, pour que ces limites puissent être respectées, il faudrait réduire de 5 fois les niveaux mesurés lors de l'opération de la meuleuse sur une surface courbée.

Les résultats de comparaison entre les meuleuses (section 4.1) démontrent qu'il peut y avoir des différences considérables entre les niveaux de vibrations provoqués par différents modèles. Ces résultats indiquent que l'utilisation de la meuleuse no. 1 au lieu de la meuleuse no.5 réduit les niveaux d'exposition par un facteur de 2. Certains autres modèles peuvent être disponibles sur le marché qui favoriseraient une diminution notable des niveaux d'exposition aux vibrations. À cet effet, une étude précédente [9] comportant des mesures similaires sur des meuleuses munies d'un dispositif de réduction du bruit a permis d'identifier un modèle de meuleuse dont le niveau global de vibrations est environ 4 fois moins élevé que le niveau mesuré sur la meuleuse no. 5, malgré une vitesse de rotation maximale deux fois plus basse. De plus, cette dernière étude a permis de constater l'importance à accorder à la meule elle-même en tant que source de vibrations, provoquant, dans certains cas, un niveau global de vibrations trois fois plus élevé lorsque la meuleuse opérait à vide avec la meule que lorsqu'elle opérait à vide sans la meule. Ainsi, le déséquilibre de la meule constitue une source importante de vibrations dont l'effet, selon certaines études [10], pourrait être atténué en soumettant la meule à une période de rodage visant à stabiliser l'état d'équilibre.

5.0 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les résultats des mesures de vibrations sur des meuleuses pneumatiques utilisées dans un chantier naval démontrent qu'il existe des différences importantes dans les niveaux de vibrations générés par les différents modèles de meuleuses et pour les différentes méthodes d'utilisation. L'analyse en situation réelle de travail d'un des modèles de meuleuse dont la vitesse de rotation est 12000 rpm démontre que les niveaux d'exposition sont particulièrement importants, la susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud s'établissant à 10 % de la population des travailleurs après une ou deux années seulement d'opération continue.

Les recommandations suivantes visent à limiter le nombre de travailleurs susceptibles de développer le phénomène de Raynaud provoqué par l'utilisation de meuleuses portatives pneumatiques:

- Les modèles de meuleuses les moins vibrants devraient être utilisés tels que les modèles à faible vitesse de rotation (e.g. no.1) ou un modèle muni d'un dispositif de réduction du bruit [9]. Une analyse de productivité devrait cependant compléter l'évaluation de la meuleuse.

- Comme la meule semble être à l'origine de niveaux importants de vibrations, des démarches devraient être envisagées afin d'identifier si une meule parfaitement équilibrée au départ est susceptible de provoquer des niveaux d'exposition aux vibrations moins élevés comme le laisse supposer la littérature traitant du sujet.

- Dans la mesure du possible, une méthode de meulage privilégiant le meulage à angle avec la pièce devrait être encouragée tandis que l'utilisation du meulage par sautillement devrait être restreinte.

Dans l'ensemble, les mesures préventives proposées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) devraient être appliquées [5]. Celles-ci comportent:

- L'implantation d'un système de surveillance médicale incluant des examens médicaux.

- Le maintien des équipements en bon état de fonctionnement, selon les instructions du fabricant.

- L'interruption de périodes prolongées d'exposition continue en prévoyant des périodes pendant lesquelles l'opérateur n'est pas soumis aux vibrations de la machine-outil.

- L'utilisation d'une force minimale de préhension par l'opérateur de façon à réduire la transmission des vibrations aux mains.

- Le port de gants dont le but principal est de garder les mains au chaud, le froid et l'humidité étant des facteurs importants dans le développement de problèmes vasculaires.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Rapport DIT-82-113. (1982). Les vibrations engendrées par les outils portatifs. État de la technologie et contexte socio-économique. Volume 3. Les meuleuses. Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ), Sainte-Foy (Québec). 30 pp.

[2] PNEUROP (1981). Test Procedure for the Measurement of Vibration from Hand Held (Portable) Power Driven Grinding Machines. General Secretariat-British Compressed Air Society, Londres WC2H 7BN.

[3] Brammer, A.J. (1984), Exposition de la main aux vibrations dans le secteur industriel. Rapport CNRC no. 22845. 65 pp.

[4] NIOSH Technical Report, (1982) Vibration White Finger Disease in U.S. Workers using Pneumatic Chipping and Grinding Hand Tools. I: Epidemiology. Publication no. 82-118. 172 pp.

[5] Norme internationale ISO 5349. Vibrations mécaniques - Principes directeurs pour le mesurage et l'évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Première édition. 1986-05-15.

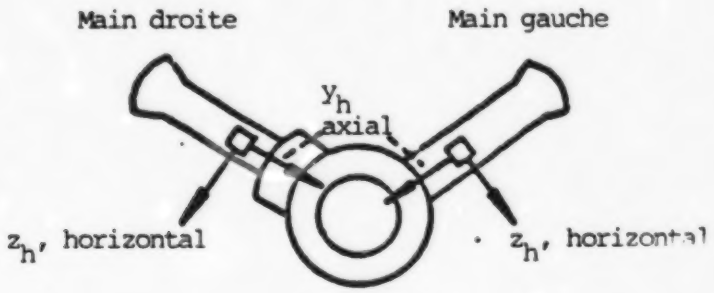
[6] Boileau, P.E., Scory, H., Turcot, D. (1988). Méthodologie pour évaluer l'exposition des individus aux vibrations mains-bras en milieu de travail. Rapport de recherche (en préparation) IRSST, Montréal (Québec).

[7] Griffin, M.J. (1982) Hand-arm Vibration Standards and Dose-Effect Relationships. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley & Sons, 259-268.

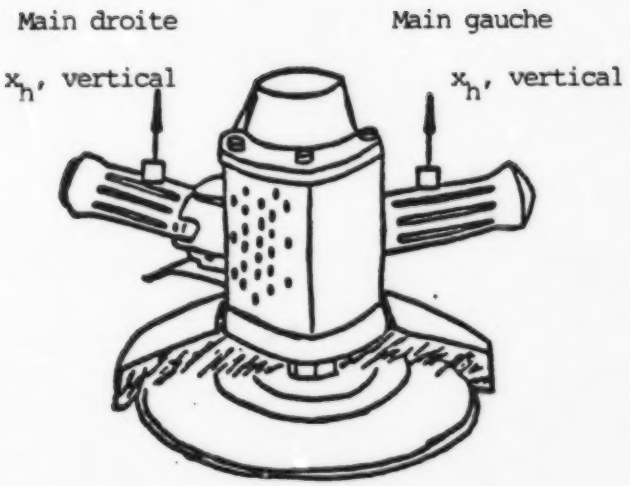
[8] ACGIH 1987. Hand-arm (segmental) vibration. Dans Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1987-88. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 85-90.

[9] Boileau, P.-E., Scory, H., Boutin, J., (1987). Rapport d'expertise. Exposition aux vibrations mains-bras pour deux modèles de meuleuses pneumatiques verticales de marque Atlas Copco. Direction des laboratoires, IRSST, Montréal (Québec).

[10] Notes techniques de PNEUROP (Comité 17-Vibrations). Mesures de vibrations et de balourds engendrés par une meuleuse à axe vertical. Document de travail no. 60/81/JB. 1981-02-12.



(a)

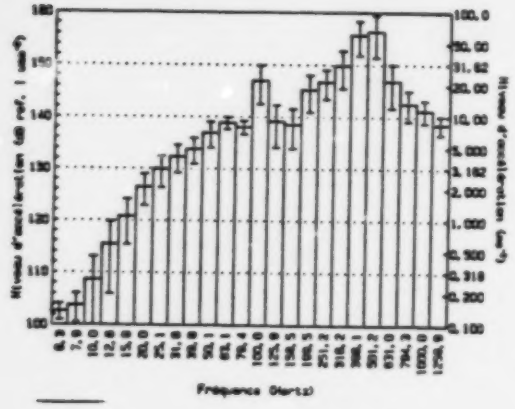


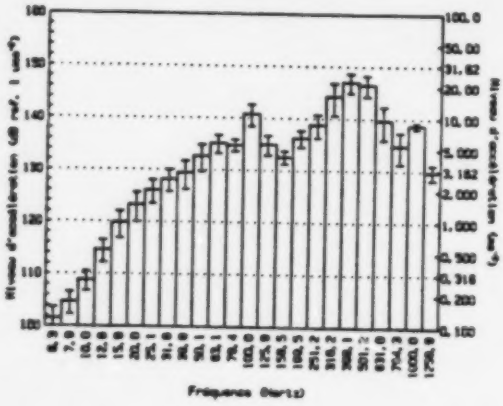
(b)

Figure 1: Système de coordonnées indiquant la direction des vibrations mesurées selon (a) les axes y_h et z_h et (b) l'axe x_h pour chacune des deux poignées sur une meuleuse verticale.

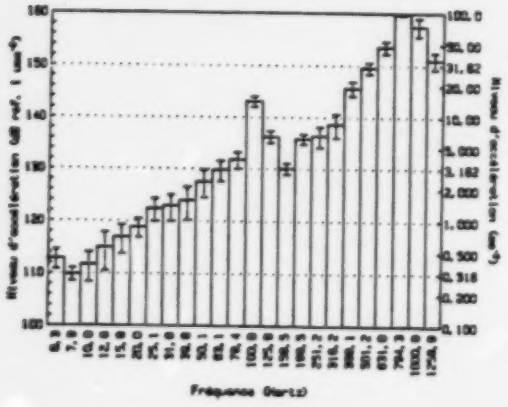
Main gauche

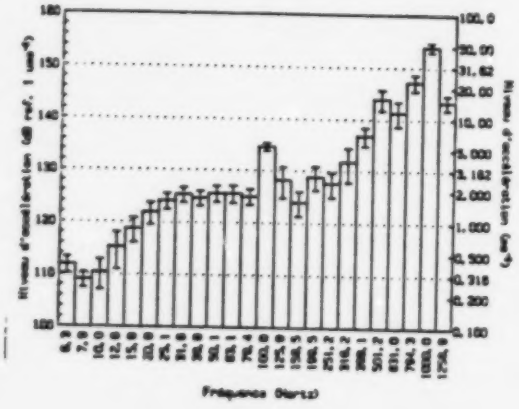
Main droite



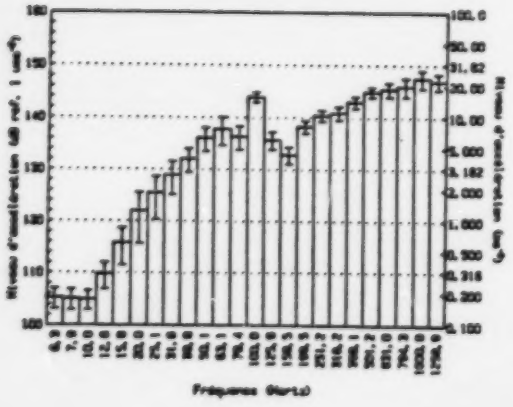


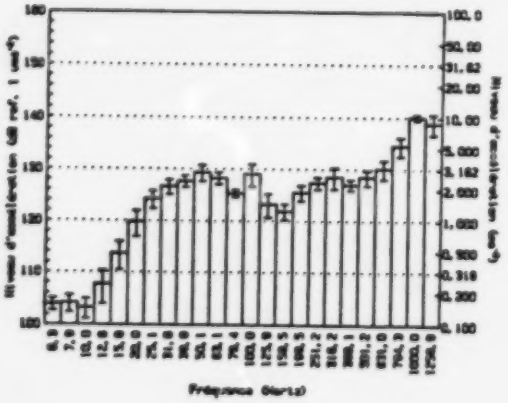
(a) Axe x_h





(b) Axe y_h





(c) Axe z_h

Figure 2: Spectres en fréquences (non pondérés) des vibrations mesurées sur chacune des poignées d'une meuleuse (no.1) pneumatique verticale ayant une vitesse de rotation de 7700 rpm.

TABLEAU 1: VALEURS D'ACCÉLÉRATION GLOBALE PONDÉRÉE SUR CHAQUE POIGNÉE DES MEULEUSES POUR CHACUNE DES DIRECTIONS x_h, y_h ET z_h LORS D'ESSAIS CONTRÔLÉS

MEULEUSE NO.	MAIN GAUCHE			MAIN DROITE		
	$a_{w,x}$ (ms^{-2})	$a_{w,y}$ (ms^{-2})	$a_{w,z}$ (ms^{-2})	$a_{w,x}$ (ms^{-2})	$a_{w,y}$ (ms^{-2})	$a_{w,z}$ (ms^{-2})
1 neuve, 7700 rpm	8 ± 2	4.3 ± 0.3	5.2 ± 0.9	4.4 ± 0.7	2.8 ± 0.3	2.4 ± 0.3
2 neuve, 6000 rpm	12 ± 1	3.9 ± 0.4	2.8 ± 0.2	6.3 ± 0.8	4.0 ± 0.5	2.0 ± 0.2
3 usagée, 6000 rpm	13 ± 2	4.0 ± 0.2	2.8 ± 0.3	7.6 ± 0.5	4.3 ± 0.3	2.5 ± 0.2
4 usagée, 12000 rpm	21 ± 2	6.0 ± 0.3	9.0 ± 0.8	13 ± 2	8.5 ± 0.9	3.6 ± 0.7
5 usagée, 12000 rpm	16 ± 2	6.8 ± 0.4	6.4 ± 0.6	11 ± 1	6.3 ± 0.4	3.1 ± 0.3

TABLEAU 2: VALEURS D'ACCÉLÉRATION GLOBALE PONDÉRÉE SUR CHAQUE POIGNÉE DE LA MEULEUSE NO. 5 POUR DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MEULAGE LORS D'ESSAIS CONTRÔLÉS

MÉTHODE DE MEULAGE	MAIN GAUCHE			MAIN DROITE		
	$a_{w,x}$ (ms^{-2})	$a_{w,y}$ (ms^{-2})	$a_{w,z}$ (ms^{-2})	$a_{w,x}$ (ms^{-2})	$a_{w,y}$ (ms^{-2})	$a_{w,z}$ (ms^{-2})
Circulaire, meule à plat	18 ± 2	7.5 ± 0.3	6.6 ± 0.3	11.5 ± 0.8	6.6 ± 0.2	3.0 ± 0.2
Sautillement de la meule	31 ± 2	11.9 ± 0.6	10 ± 1	24 ± 1	8.8 ± 0.2	8.0 ± 0.5
Meule à angle avec la pièce	6 ± 1	4.8 ± 0.3	2.2 ± 0.5	3.3 ± 0.2	3.3 ± 0.4	1.0 ± 0.1

TABLEAU 3: NIVEAUX D'ACCÉLÉRATION GLOBALE PONDÉRÉE SUR CHAQUE POIGNÉE DE LA MEULEUSE NO. 5 POUR DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DE TRAVAIL

CONFIGURATION DE TRAVAIL	MAIN GAUCHE			MAIN DROITE		
	$a_{w,x}$ (ms^{-2})	$a_{w,y}$ (ms^{-2})	$a_{w,z}$ (ms^{-2})	$a_{w,x}$ (ms^{-2})	$a_{w,y}$ (ms^{-2})	$a_{w,z}$ (ms^{-2})
Meulage de revers (surface rejointe du dessous)	12.6	**17.6**	7.4	9.2	9.2	4.3
Surface verticale	13.1	**17.4**	7.7	13.2	4.8	3.2
Surface horizontale (surface rejointe du dessus)	**18.0**	12.3	6.9	14.9	5.6	5.3
Surface courbée	13.1	**20.5**	5.2	10.7	4.6	2.4

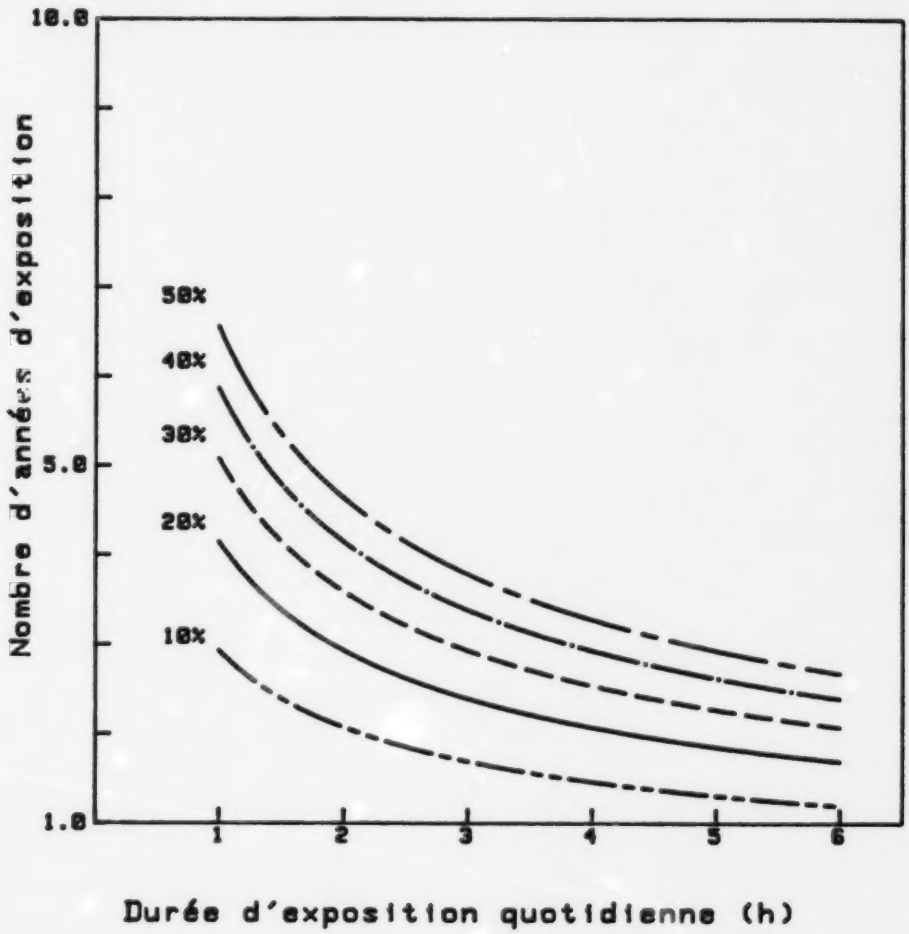


Figure 3: Susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud en fonction de la durée quotidienne et du nombre d'années d'exposition aux vibrations générées par une meuleuse pneumatique verticale (no.5) en situations réelles de travail.